

Radial auswärts beaufschlagte Pumpenschaufeln kleiner radialer Erstreckung

Gräger, Friedrich

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 5, 1953, S. 69-84



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Radial auswärts beaufschlagte Pumpenschaufeln kleiner radialer Erstreckung *)

Von Friedrich Gräger, Merseburg

Mit 16 Abbildungen

Vorgelegt von Herrn C. Pfeleiderer

Summary: In the course of investigations on centrifugal pumps made in the „Institut für Strömungsmaschinen“ of the Technical University, Brunswick, pseudo-axial-flow impellers were investigated, i. e. impellers with vanes short compared to the radius of the impeller wheel. Their radius-ratio was $r_2/r_1 = 1,125$. The use of these vanes was to facilitate their application in the design of ventilators and the studies on flow in the axial-flow-vanes which are of great importance nowadays. Particularly the phenomenon of stalling needs, further investigation.

Einleitung

Im Verfolg von Untersuchungen über Kreiselpumpen sind im Institut für Strömungsmaschinen der Technischen Hochschule Braunschweig auch solche radialen Laufschaufeln untersucht worden, die in radialer Richtung sehr kurz im Vergleich zum Halbmesser (Abb. 1 und ff.) sind, nämlich ein Radienverhältnis r_2/r_1 nur von 1,125, also nahe bei 1, haben (Pseudo-Axialschaufeln). Diese Schaufelart wird einerseits beim mehrstufigen Einradlader (Umkehrung der Eyermann- oder SSW-Radial-Turbine) und bei Ventilatoren häufig benutzt, ohne daß zuverlässige Versuchsergebnisse bekanntgeworden wären. Ferner sind diese Schaufeln in ihren Eigenschaften den Axialschaufeln insofern ähnlich, als die Strömung auf fast gleichbleibendem Halbmesser erfolgt. Der letztere Umstand gestattet, wertvolle Rückschlüsse auf die Eigenschaften der eigentlichen Axialschaufeln zu ziehen, wobei noch zuzustatten kommt, daß die Schaufelflächen einfach gekrümmt sind und deshalb nicht bloß eindeutige Werte für die Schaufelwinkel vorliegen, sondern Form und Zahl der Schaufeln in einfachster Weise zu verändern sind.

Die Untersuchungen sollten auch die Eigenschaften bei gleich- und gegen-sinnigem Eintrittsdrall (Gleich- bzw. Gegenlauf) klären.

Insbesondere war festzustellen, welche Bestwerte hinsichtlich Schaufelzahl, Schaufelform, Schaufelwinkel usw. bestehen und ob Abreißen der Förderung das Betriebsgebiet in fühlbarem Umfang einschränkt.

Die Versuche wurden mit Luft durchgeführt. Im Hinblick auf das umfangreiche Versuchsprogramm mußte ferner eine möglichst einfache Herstellung der Schaufelkränze ermöglicht und deshalb eine verhältnismäßig niedrige Umfangsgeschwindigkeit ($u_2 = 56$ bis 75 m/s) gewählt werden. Obwohl

*) Die vorliegende Arbeit ist inhaltlich nahe verwandt mit der nachfolgenden von R. Kretschmer. Für beide Arbeiten gelten das Literaturverzeichnis und die Übersicht der Bezeichnungen, welche sich am Schluß der zweiten Arbeit befinden, gemeinsam.

dadurch die Mach-Zahl unter die beim Verdichter üblichen Werte kommt, erschien diese zeitsparende Vereinfachung geboten, da es sich zunächst um einen Vorstoß in Neuland handelte.

Die folgende Darstellung ist eine zusammenfassende Wiedergabe des wesentlichen Inhalts meiner bisher unveröffentlichten Dissertation [12] *).

Zahlentafel 1 gibt einen Überblick über das durchgeführte Versuchsprogramm, das sich nach Spalte 1 auf 8 verschiedene Schaufelformen zwischen $\beta_2 = 40^\circ$ bis 125° nach Abb. 2 bis 7 erstreckt. Dabei sind jeweils die Schaufelzahl z (Spalte 4), der Winkel α_1 des Eintrittsleitrades, teilweise auch der Eintrittswinkel α_4 der Austrittsleitvorrichtung und schließlich die Spaltweite geändert worden, so daß außerordentlich viele Einzelversuche (im ganzen etwa 200 Versuche) nötig waren, über die hier aus Raumgründen nur in zusammenfassender Darstellung berichtet werden kann. Weitere Angaben über die Form der Schaufeln und ihre Befestigung enthalten Spalte 3 und 8. Die Profilschaufeln (Nr. 2, 3 und 8 bzw. Abb. 4 und 7) sind lediglich zum Vergleich mit den Blechschaufeln herangezogen.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde dem einseitig offenen Kranz (Abb. 8, *a* und *c*) der Vorzug gegeben, sofern Vergleichsversuche keinen nennenswerten Unterschied im Wirkungsgrad und in der Förderhöhe gegenüber der geschlossenen Form (d. h. mit seitlichem Deckband, Abb. 8, *b* und *d*) ergaben. Deshalb sind die Kränze mit Austrittswinkeln $\beta_2 = 90^\circ$ in dieser Ausführungsform untersucht, während bei den vorwärts gekrümmten Schaufeln 6 bis 8 hauptsächlich die geschlossene Radform (Abb. 8*b*) benutzt wurde.

1. Versuchseinrichtung

Gemäß Abb. 1 ist die Einmündung (15) in das Saugrohr als Meßdüse ausgebildet, die auf der Luftmeßstrecke des Instituts geeicht wurde. An das Druckrohr (nicht gezeichnet) ist ein konischer Auslauf angeschlossen, um die Widerstände des Luftweges klein zu halten, und die Kennlinien der Pumpe möglichst weit ausfahren zu können. Die Einstellung der Förderhöhe geschieht durch Drosselung in der Druckleitung mit einem einfachen Blechschieber. Der Meßdruck der Einlaufdüse (Meßkammer 16) wird mittels eines Miniskops der Debro-Werke, der Differenzdruck zwischen Druckrohr und Saugraum, ebenso zwischen dem Gesamtdruck hinter dem Rad und dem Saugraum, mittels eines gewöhnlichen U-Rohres mit Wasserfüllung, der Leistungsbedarf an den Ausschlägen des pendelnd gelagerten Motorgehäuses gemessen. Am freien Wellenende befindet sich der Drehzahlmesser.

Das Laufrad (2) sitzt fliegend auf der Motorwelle (3), so daß das vom Rad aufgenommene Drehmoment unmittelbar gemessen wird. Sofern die Leitschaufeln sowohl des Eintritts wie des Austritts zwischen parallelen Wänden liegen, sind sie (ähnlich wie die Finkschen Drehschaufeln der Francis-Turbine) verstellbar eingerichtet (Hebel 8 und Ritzel 9 in Abb. 1, ferner Abb. 1*a*). Die

*) Die in eckigen Klammern angegebenen Zahlen beziehen sich auf das Literaturverzeichnis S. 102.

Verstellung der aus 0,1 mm dickem Stahlblech bestehenden Eintrittsleitschaufeln (7) geschieht als Verformung durch Verdrehen des Verstellrings (11) mittels Ritzel (9) und Zahnsegment (10). Auch die dem Laufrad nachgeschalteten Leitschaufeln (12) sind in gleicher Weise verstellbar eingerichtet (Abb. 1a).

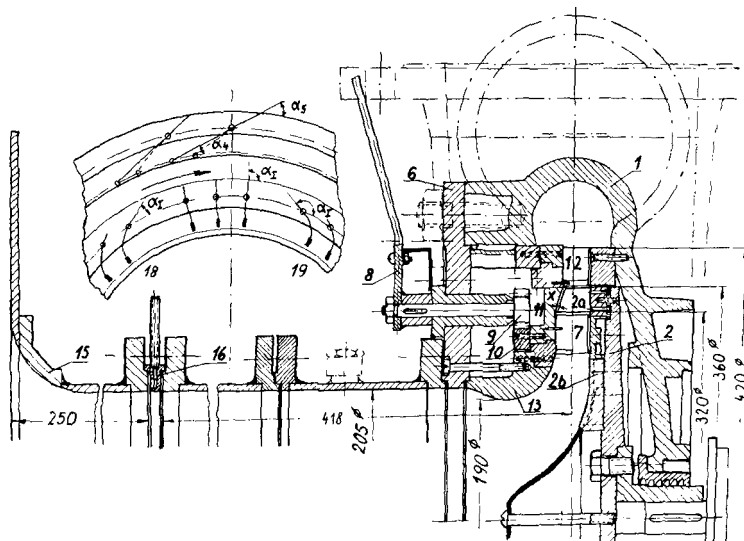


Abb. 1 u. 1a. Übersicht über die Versuchspumpe von Gräger.

Abb. 1. Querschnitt der ganzen Anordnung

Abb. 1a. (Links oben) Veränderung der Leitschaulfeln durch Verbiegung

Sofern ohne ein solches Eintrittsleitrad gefahren wurde, konnte die saugseitige Begrenzungswand des Laufrades auch nach Abb. 8a ausgeführt werden.

Über die Form der Laufschaufeln und ihre Befestigung an der Radwand gibt Tafel 1 in Verbindung mit Abb. 2 bis 7 Auskunft. Bei den Schaufeln Nr. 1 und 4 ist eine weitgehende Veränderung der Schaufelzahl durch Anwendung der aus Abb. 2 und 3 ersichtlichen Befestigungsart ermöglicht

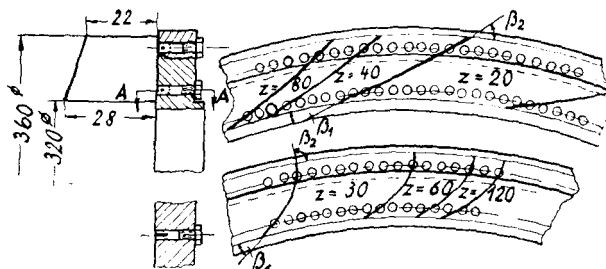


Abb. 2. (Oben) Schaufel Nr. 1, $\beta_2 = 40^\circ$, Veränderung der Schaufelzahl

Abb. 3. (Unten) Schaufel Nr. 4, $\beta_2 = 90^\circ$, Veränderung der Schaufelzahl

worden. Die übrigen Schaufeln Nr. 5 bis 8 (Abb. 4 bis 6) sind mit der Seitenwand mittels eines Weichlotes fest verlötet mit Ausnahme der Profilschaufeln Nr. 2 und 3 (Abb. 7), welche eingestemmt sind. Dieser Verzicht auf die Austauschbarkeit hat sich teils wegen der geringen Wandstärke der Schaufeln, teils aber auch zur Erhöhung der Festigkeit des Schaufelfußes als zweckmäßig

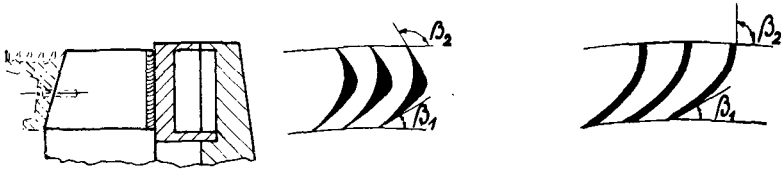


Abb. 4 u. 5. Schaufel Nr. 8 und 5, $\beta_2 = 125^\circ$ bzw. 90° , Befestigung durch Weichlot

Abb. 4, links. Profilschaufel Nr. 8, $\beta_2 = 125^\circ$

Abb. 5, rechts. Blehschaufel Nr. 5, $\beta_2 = 90^\circ$

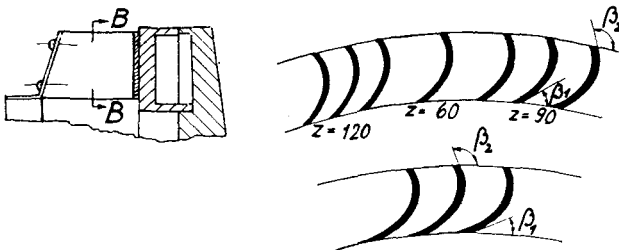


Abb. 6. Schaufel Nr. 6 und 7, $\beta_2 = 120^\circ$, Blehschaufel mit Deckband

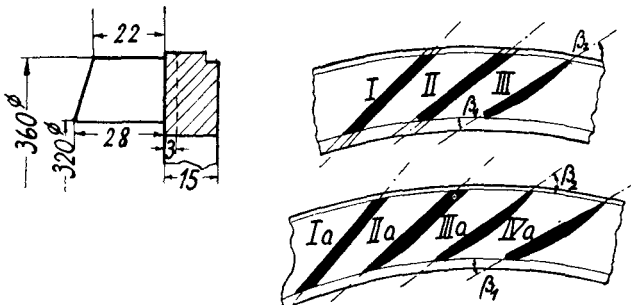


Abb. 7. Schaufel Nr. 2 und 3, Profil I bis IVa, 3 mm Dicke

erwiesen. Der Schaufelverlauf wurde punktweise unter Annahme eines geradlinigen β -Verlaufs in Abhängigkeit von r zwischen den gegebenen Grenzen β_1 und β_2 berechnet. Bei den Schaufeln mit $\beta_2 = 90^\circ$ und 120° sind zwei verschiedene Werte für β_1 gewählt. Bei der 40° -Schaufel ist nur ein Winkel β_1 untersucht, weil bei einer Vergrößerung die Schluckfähigkeit des verwendeten Spiralgehäuses überschritten und bei einer Verkleinerung das auftretende Drehmoment auch bei der höchstzulässigen Drehzahl zu klein geworden wäre,

um mit dem verwendeten Pendelmotor eine ausreichende Meßgenauigkeit zu erzielen.

Der bei den seitlich offenen Rädern zwischen Laufschaufel und ruhender Wand vorhandene axiale Spalt x (Abb. 1 und 8) wurde für eine große Zahl von Versuchen so klein gehalten, wie mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit möglich war. Er betrug bei der 90°-Schaufel 0,3 mm, gemessen im Ruhezustand des Läufers. Bei der 40°-Schaufel war 0,6 mm erforderlich, da sonst Anstreifen eintrat, vermutlich weil diese flache Schaufel sich unter dem Einfluß der Fliehkräfte stärker deformierte, wodurch sich wegen der kegeligen Gegenfläche der Spalt verringerte. Der später in Abb. 12 angegebene Spalt bezieht sich indessen auf den Laufzustand, wobei der Läufer axiale Verschiebungen bis 0,3 mm ausführte. Infolge der Unmöglichkeit, die Schaufeln genau

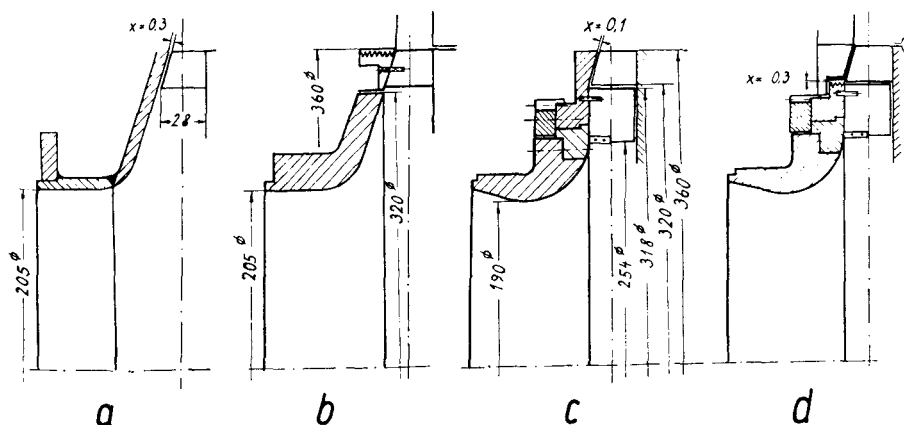


Abb. 8. Die verwendeten Formen der seitlichen Begrenzung der Räder. *a* und *b* ohne Eintrittsleitrad, *c* und *d* mit verstellbarem Eintrittsleitrad, *a* und *c* ohne, *b* und *d* mit Deckband

gleich herzustellen, sind die Spalte der einzelnen Schaufeln Schwankungen unterworfen und die angegebenen Breiten als Mittelwerte anzusehen.

Der Spaltverlust ist bei diesen engen Spalten als vernachlässigbar klein betrachtet worden. Die gleichmäßige Einhaltung dieses engen Spaltes bildete eine wichtige und schwierige Aufgabe bei der Versuchsdurchführung. Bei den Schaufeln 1, 2, 4 und 8 sind auch Versuche über den Einfluß der Spaltweite unter Vergrößerung dieses Mindestspaltes angestellt worden, die zeigen, daß erhebliche Energieverluste eintreten können (S. 79). Der Undichtheitsverlust an der Abdichtungsstelle der Nabe ist rechnerisch zu weniger als 0,1 % ermittelt worden.

2. Versuchsergebnisse

Die Kennlinien (Abb. 9 bis 12) sind durchweg mit dem auf senkrechten Eintritt bezogenen Füllungsgrad

$$\varepsilon_{\perp} = V_x / V_{\perp} = \varepsilon V / V_{\perp}$$

als Abszisse aufgetragen. Dabei wurde V_{\perp} unter Berücksichtigung des Einflusses der endlichen Schaufeldicke aus

$$V_{\perp} = \pi D_1 b_1 u_1 \operatorname{tg} \beta_1 \frac{t_1 - \sigma_1}{t_1} \quad (1)$$

berechnet. An Stelle der Förderhöhe H_x wurde die dimensionslose Druckzahl $\psi_x = 2gH_x/u_2^2$ verwendet.

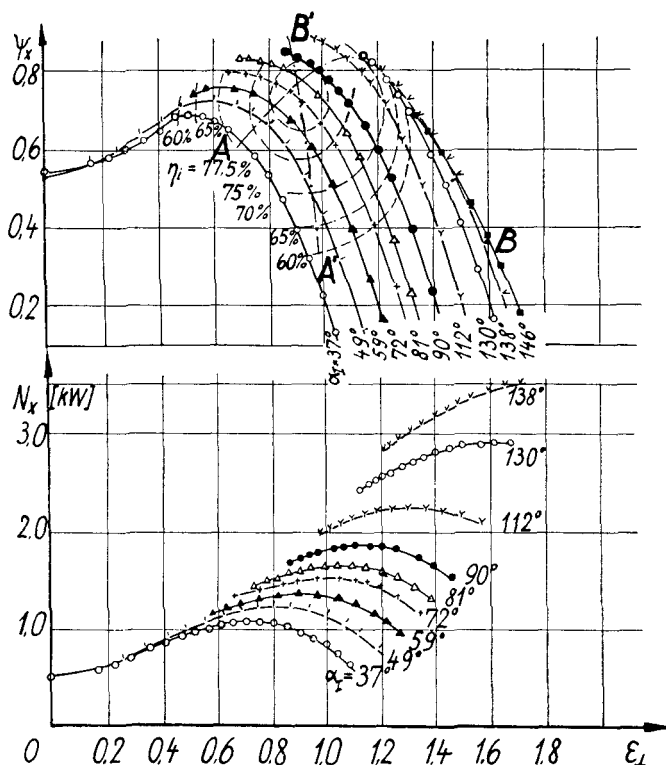


Abb. 9. Kennlinien von Schaufel Nr. 1 ($\beta_2 = 40^\circ$), $z = 42$ bei verschiedenen Stellungen des Eintrittsleitrades. Linie A—B stoßfreier Laufradeintritt. Linie A'—B' stoßfreier Leitradeintritt

Die Förderhöhe H_x beträgt

$$H_x = h_{ad\,x} + \frac{c_D^2 - c_S^2}{2g}. \quad (2)$$

(Die Fußzeichen D und S beziehen sich auf Saug- und Druckstutzen der Pumpe.)

Leider ist es nicht möglich, alle bei den Versuchen aufgenommenen Kennlinien wiederzugeben.

a) *Allgemeine Beobachtungen.* Alle untersuchten Schaufelformen hatten die wenig erwünschte Eigenschaft, daß bei Unterschreitung eines Füllungs-

grades, der häufig wenig unter dem des besten Wirkungsgrades lag, Förderstrom und Förderhöhe sprunghaft zurückgingen, wobei gleichzeitig der Wirkungsgrad sich stark verschlechterte (Abb. 12). Daß dieses Abreißen der Förderung bei allen verwendeten Radformen auftrat, ist aus dem Grunde bemerkenswert, weil die sonst gebräuchlichen Formen des Radialrades (d. h. solche mit größerem Radienverhältnis r_2/r_1) diese Eigenschaft nur ausnahmsweise zu zeigen pflegen [3]. Diese Beobachtung kam auch aus dem Grunde

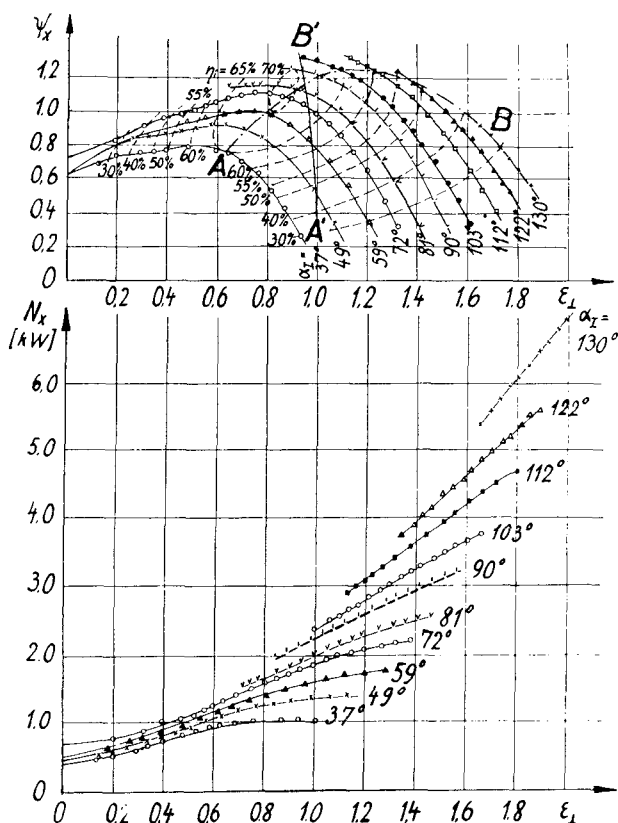


Abb. 10. Kennlinien von Schaufel Nr. 4 ($\beta_2 = 90^\circ$) $z = 120$ bei verschiedenen Stellungen des Eintrittsleitrades. Linie A—B stoßfreier Laufradeintritt, Linie A'—B' stoßfreier Leitradeintritt

unerwartet, weil die vorliegenden Laufkränze zwischen ruhenden radialen Leitkränzen eingebettet sind (Abb. 1 und 8) und deshalb kein Anlaß zu Unterströmungen (wie bei axialer Beaufschlagung) vorliegt.

Eine solche Instabilität hat ihre Ursache darin, daß mit abnehmender Füllung ein Totraumgebiet auf der Schaufelsaugseite sich bildet, weil der Winkel der relativen Anströmung kleiner wird als der Anfangswinkel β_1 der Schaufel. Dieses Totraumgebiet vermag dann dem steigenden Spaltüberdruck nicht standzuhalten, so daß dieser nach der Saugseite durchschlägt. Es ist verständlich, daß dieses Durchschlagen bei den vorliegenden radial kurzen

Schaufeln leichter eintritt als bei Schaufeln mit der üblichen großen radialen Erstreckung. Eigentümlich aber ist, daß die Vergrößerung der Schaufelzahl keine Besserung brachte (vielleicht wegen des wachsenden Einflusses der Schaufelverengung am Eintritt). Bei kleinen Schaufelzahlen, wo der Wirkungsgrad schlecht ist, rückt die Unstetigkeit der Kennlinie näher an die Ordinatenachse heran (weil die Strömung in den Laufkanälen wahrscheinlich durchgängig einen ungeordneten Charakter hat). Ferner bleibt das Abschnappen bei starkem Drall der Eintrittsströmung, der gleichsinnig mit der Raddrehung gerichtet ist (Gleichlauf), aus (Abb. 14), während es im übrigen bei um so

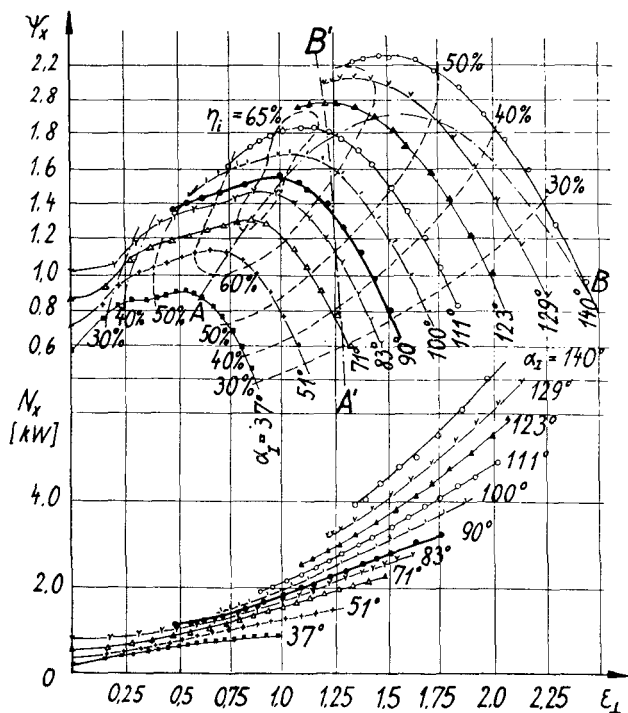


Abb. 11. Kennlinien von Schaufel Nr. 6 ($\beta_2 \approx 120^\circ$) $z = 120$ bei verschiedener Stellung des Eintrittsleitrades. Linie A—B stoßfreier Laufradeintritt, Linie A'—B' stoßfreier Leitradeintritt. Beachte: Wesentliche Verlängerung des stabilen Kurvenzweiges gegenüber $\beta_2 = 90^\circ$

größerem Füllungsgrad erfolgt, je kleiner dieser Drall bzw. je größer der Gegenlauf ist. Hierdurch wird das Anwendungsgebiet des Gegenlaufes eingeschränkt. Die Abreißgefahr wächst mit wachsendem Spaltüberdruck, also wachsendem $r\psi$ (r = Reaktionsgrad) und ist somit bei $\beta_2 = 90^\circ$ (Schaufel 4 und 5) am größten, jedoch bei $\beta_2 = 40^\circ$ (Schaufel 1) immer noch größer als bei der Hakenschaufel ($\beta_2 = 120^\circ$). Nach Abb. 14 ist die zulässige Abweichung der relativen Eintrittsgeschwindigkeit von der Richtung der Stoßfreiheit bei Gleichlauf größer als bei Gegenlauf. Besonders wichtig ist die Feststellung, daß Schaufelprofile mit $\beta_2 > 90^\circ$, also die „Hakenschaufeln“, weit größere stabile Gebiete zeigen (Abb. 11) als die Profile mit $\beta_2 = 90^\circ$ (z. B. Abb. 9 und 10).

Alle Bemühungen, das stabile Arbeitsgebiet durch Beeinflussung der Grenzschicht der Schaufel (Stolperdraht, Spaltflügel, Wegblasen der Grenzschicht durch Spaltluft) auszudehnen, hatten keinen wesentlichen Erfolg. Bemerkenswert ist aber, daß bei senkrechtem Eintritt die Vorschaltung des Eintrittsleitrades, das dann aus ebenen, senkrecht zum Umfang gerichteten Platten besteht und offenbar als Gleichrichter wirkt, durchweg eine wesentliche Besserung brachte.

Eine weitere Verlängerung des stabilen Arbeitsbereiches ergab sich beim Übergang vom parallelwandigen Rad ($b_1 = b_2$) auf das konische Laufrad, wie es dann für die Versuche verwendet wurde.

Im folgenden wird nur der Bereich der gesunden Strömung behandelt. Soweit die Kennlinien nach Abb. 9 bis 12 nicht bis zur Ordinatenachse gezeichnet sind, gelten sie für das stabile Gebiet. Ihr linkes Ende bezeichnet dann den Beginn des Abreißens.

Sorgfältige Herstellung, d. h. Beseitigung aller Ungenauigkeiten in der Ausführung der Schaufeln, verkleinert das Abreißgebiet.

Besondere Beachtung verdient der Gewinn an Förderhöhe und Wirkungsgrad, der durch den Übergang vom parallelwandigen auf den sich nach außen verengenden Einlauf nach Abb. 8a erzielt wurde, ähnlich wie dies auch hinsichtlich des Laufrades oben festgestellt wurde.

b) *Einfluß von Schaufelwinkel β_2 und Schaufelzahl z .* Der aus den Kennlinienfeldern zu entnehmende Einfluß von z und β_2 auf den Wirkungsgrad ist

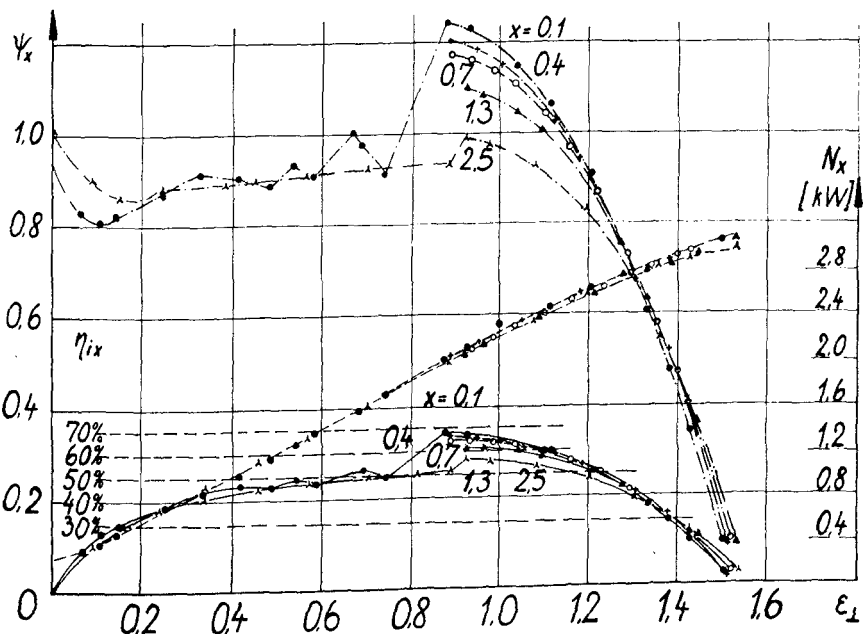


Abb. 12. Einfluß der seitlichen Spaltweite x auf Druckziffer, Leistungsbedarf und Wirkungsgrad bei Schaufel Nr. 4 ($\beta_2 = 90^\circ$) mit $z = 120$

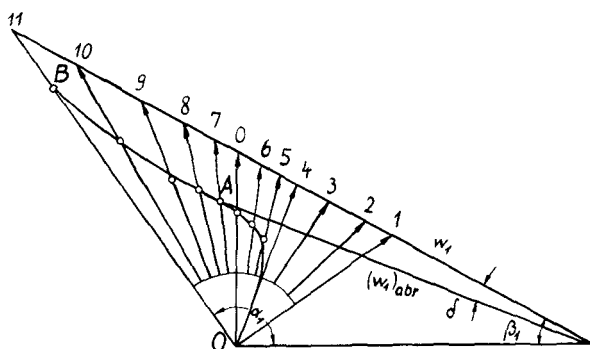


Abb. 13. Linie OAB ist der geometrische Ort der Endpunkte der Vektoren der relativen Anströmgeschwindigkeit vor der Schaufel 5 ($\beta_2 = 90^\circ$) bei $z = 70$ im Augenblick des Abreißen. α_1 = Winkel der absoluten Anströmgeschwindigkeit, β_1 = Winkel der Anfangstangente an die Mittellinie der Schaufel

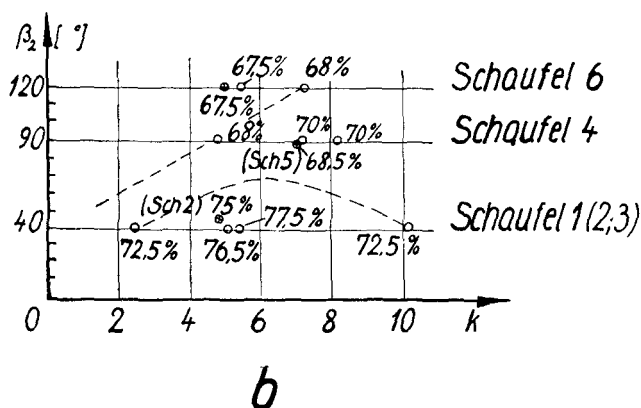
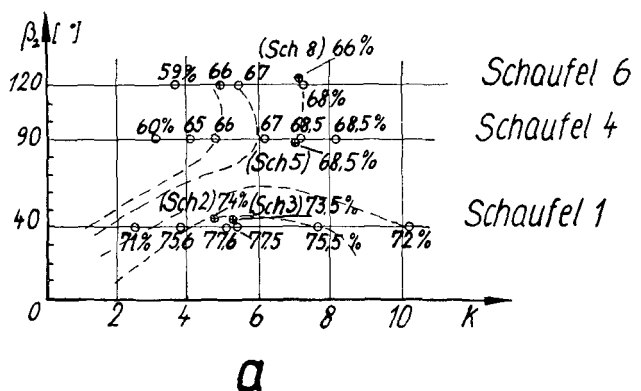


Abb. 14. Höchstwerte der Wirkungsgrade η ; im (z, β_2) -Diagramm, wobei die Schaufelzahl z durch den Faktor k in Gl. (3) ausgedrückt ist. *a* senkrechter Eintritt, *b* Eintritt unter $\alpha_0 = 70^\circ$

in Abb. 14 in Form einer Querschnittsdarstellung übersichtlich zusammengestellt, indem die Linien gleicher Bestwerte des Wirkungsgrades eingetragen wurden. Wegen der geringen Zahl der untersuchten Austrittswinkel β_2 bedürfen die eingetragenen Linien noch späterer Nachprüfung und Ergänzung. Es sind nur die Versuche berücksichtigt, bei denen die Austrittsleitvorrichtung ungefähr normal belastet war. An Stelle von z ist der Parameter k in der nachfolgenden Gleichung

$$z = k \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} \cdot \sin \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (3)$$

als Abszisse verwendet und damit der Einfluß der Winkel β_1 und β_2 weitgehend ausgeschaltet. Das Maximum von η liegt offenbar im Bereich etwa von $k = 6,5$, also dem gleichen Wert wie bei normalen Radialrädern. Dabei muß allerdings hervorgehoben werden, daß in dem brauchbaren Bereich der Schaufelzahl ($z \approx 50$ bei $\beta_2 = 40^\circ$, $z \approx 90$ bei $\beta_2 = 90^\circ$, $z \approx 105$ bei $\beta_2 = 120^\circ$) der Wirkungsgrad sich bei Wechsel von z bzw. k nur im Rahmen der erzielbaren Versuchsgenauigkeit ändert. Die bei $\beta_2 = 90^\circ$ und 120° sich ergebenden großen Schaufelzahlen dürften für die Herstellung wegen der entstehenden kleinen Kanalweiten am Eintritt unbequem sein, so daß man zu kleineren k -Werten gezwungen ist.

c) Die günstigsten Füllungsgrade, also die Füllungsgrade beim Förderstrom besten Wirkungsgrades, zeigen Abb. 15a und b in den eingeschriebenen Zahlen. Hier sind wieder nur die Versuche in Betracht gezogen, bei denen die Austrittsleitvorrichtung ungefähr mit ihrer normalen Schluckfähigkeit belastet war. Auffallend ist, daß das Wirkungsgradmaximum für alle Schaufelwinkel bei $\varepsilon \approx 1$ liegt (sofern die Schluckfähigkeit der Austrittsleitvorrichtung beim Förderstrom stoßfreien Laufradeintritts gerade ausgelastet ist). Dies steht im Gegensatz zu der an gewöhnlichen Radialrädern gemachten Erfahrung [3, 8 u. 9], wonach mit wachsendem Winkel β_2 das günstigste ε größer als 1 wird.

d) *Einfluß einer Vergrößerung des seitlichen Spaltes.* Der kleinste betriebsmäßig ohne Anstreifen zulässige Spalt betrug, wie S. 73 erwähnt, im Ruhezustand $x = 0,3$ mm, der im Betrieb auf etwa 0,1 mm überging. Bei dieser Spaltweite wurden die eigentlichen Versuche gefahren.

Zur Feststellung des Spalteinflusses wurde auch das Verhalten bei größeren Spaltweiten untersucht. Von dem erhaltenen Versuchsmaterial sind nur die Kennlinien der Schaufel 4 mit $z = 120$ in Abb. 12 angegeben.

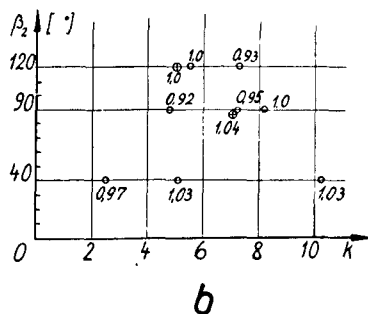
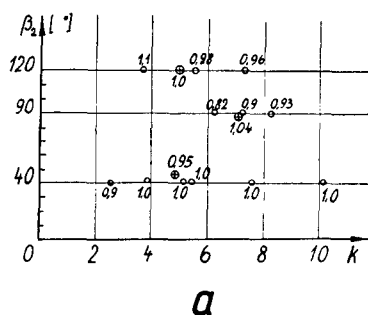


Abb. 15. Verhältnis des Förderstroms besten Wirkungsgrades zu dem des stoßfreien Laufradeintritts im (z, β_2) -Diagramm, wobei die Schaufelzahl z durch den Faktor k in Gl. (3) ausgedrückt ist. a senkrechter Eintritt, b Eintritt unter $\alpha_0 = 70^\circ$

Allgemein ist festzustellen: Während der Leistungsbedarf mit wachsender Spaltweite sich nur wenig verringert, und zwar um so weniger, je größer β_2 , d. h. je kleiner der Reaktionsgrad ist, nehmen Förderhöhe und Wirkungsgrad wesentlich stärker ab. Drückt man die verhältnismäßigen Abnahmen als Vielfaches der reduzierten Spaltbreite x/b_m aus, worin $b_m = \frac{1}{2} (b_1 + b_2)$, d. h. wird gesetzt

$$\frac{\Delta H}{H_{x \min}} \cdot 100 \% = \alpha \frac{x}{b_m}, \quad (4)$$

$$\frac{\Delta \eta_i}{(\eta_i)_{x \min}} \cdot 100 \% = \beta \frac{x}{b_m}, \quad (5)$$

so ist für Schaufel 1: $\alpha = 1,8$, $\beta = 1,35$,

Schaufel 2: $\alpha = 5,4$, $\beta = 3,90$,

Schaufel 4: $\alpha = 3,3$, $\beta = 2,3$.

Auffallend ist das ungünstige Verhalten der dicken Profilschaufel 2. Bei der 90°-Schaufel ist bemerkenswert, daß der Förderstrom besten Wirkungsgrades ebenso des Abreißpunktes fast unverändert bleiben (Abb. 12) und die Drosselkurven für mäßige Spaltbreiten, nämlich bis $x = 1,3$ mm, sich in einem Punkt schneiden.

e) *Besondere Feststellungen an den Profilschaufeln 2 und 3.* Diese Profilschaufeln, die in Abb. 7 unter III und IVa dargestellt sind, entstanden aus dem Blechstreifen I bzw. Ia und den Zwischenformen II und IIa bzw. IIIa. Diese Übergangsformen wurden untersucht, um den Einfluß der Abrundung am Kopf und Auslauf des Profils zu zeigen. Es sei hier noch bemerkt, daß die fertigen Profile III und IVa insofern voneinander abweichen, als bei III die größte Dicke bei 30 % der Länge, bei IVa in der Mitte vorhanden ist (Kreissegmentprofil). Blechstreifen I, Ia und II, gleichgültig, ob sie an der Vorderkante des Eintritts zugeschärft sind oder nicht, ergeben schlechte Wirkungsgrade von höchsten 53 bis 56 %. Sobald man aber am Eintritt auf der Saugseite weitgehend, d. h. bis etwa Mitte des Profils gemäß IIa, abrundet, tritt eine wesentliche Verbesserung auf etwa 62,5 % ein, die sich weiter steigert auf 68,5 %, wenn auch der Austritt etwas zugeschärft wird (Profil IIIa). Der Übergang von II auf IIIa zeigt, daß diese Zuschärfung des Austrittsendes etwa gleich viel bringt, wie die des Profilkopfes. Insbesondere konnte festgestellt werden, daß es bei dieser Schaufel ziemlich zwecklos ist, das Austrittsende spitz auslaufen zu lassen, sondern eine Verjüngung bis zur Viertel-Profildicke gleichwertig ist. Es wurde auch gefunden, daß das parallelwandige Rad nicht so hoch fördert und im Wirkungsgrad um etwa 5 % schlechter ist als das Rad mit kegelförmiger Wand. Dies ist wahrscheinlich eine Folge nicht nur der stärkeren Totraumbildung im Laufkanal infolge der größeren Verlangsamung, sondern hauptsächlich des größeren Impulsaustausches am Radumfang.

Ein Parallelversuch mit Deckband nach Abb. 8b am Profil III führte nur zu einer verschwindend kleinen Verbesserung gegenüber der einseitig offenen Schaufel, so daß der Verzicht auf das Deckband bei diesen Rädern hohen Reaktionsgrades (ebenso wie bei den gleichartigen Dampfturbinenschaufeln) gerechtfertigt ist.

Die Versuche mit großer Spaltweite zeigen aber, daß diese Profilschaufeln gegen große Spalte recht empfindlich sind, und zwar empfindlicher als die gleichartige Blechschaufel mit $\beta_2 = 40^\circ$ (S. 79).

Auffallend ist das ausgedehnte Abreißgebiet bei dieser Profilschaufel.

f) *Kennfeld bei Verstellung des Eintrittsleitrades.* Die bei Verstellung des Eintrittsleitrades auf verschiedene Zuströmwinkel α_1 zum Laufrad sich ergebenden Kennlinien wurden für alle in Tafel 1 angegebenen Schaufeln aufgenommen. Aus Raumgründen sind nur die Ergebnisse der Schaufel 1 mit $z = 42$ ($k = 5,4$) in Abb. 9, 4 mit $z = 120$ ($k = 8,2$) in Abb. 10, 6 mit $z = 120$ ($k = 7,3$) in Abb. 11, bei Veränderung des Winkels α_1 zwischen etwa 30 und 150° zusammengestellt und die Linien gleichen Wirkungsgrades η_i (Muschelkurven) zugefügt. Die Austrittsleitvorrichtung ist dabei jeweils aus versuchstechnischen Gründen unverändert gelassen. Die Linie AB kennzeichnet den stoßfreien Eintritt ins Laufrad, die Linie $A'B'$ den stoßfreien Eintritt in die Austrittsleitvorrichtung. Im unteren Teil der erwähnten Abbildung ist der Verlauf der Wellenleistung N_i , auf gleiche Wichte γ und gleiches n bezogen, hinzugefügt, der mit wachsendem α_1 die für abnehmenden Reaktionsgrad kennzeichnende Zunahme der Steilheit zeigt.

Die erhaltenen Versuchskurven bestätigen die weitgehende Regelbarkeit durch Verstellung der Eintrittsleitschaufeln.

Die Wirkungsgrade sind in der Nähe des senkrechten Eintritts, aber noch im Bereich $\alpha_1 < 90^\circ$, am besten und fallen nach beiden Seiten ab, so daß es sowohl eine obere wie eine untere Grenze für α_1 gibt. Die Wirkungsgrade sinken aber nach der Seite $\alpha_1 > 90^\circ$, also des gegenläufigen Eintrittsdralls, rascher ab als nach der anderen Seite. Der Grund dafür liegt in der durchgängigen Zunahme der Geschwindigkeitshöhe in den Schaufelkanälen.

3. Ermittlung weiterer Berechnungsunterlagen

a) *Erfahrungszahl ψ' in Gl. (1).* Aus der gemessenen Wellenleistung N_i läßt sich die spezifische Schaufelarbeit einschließlich Austauschverlust am Radumfang nach Abzug der Reibungsleistung N_r und N_m an den Außenwänden des Rades und in den Gleitflächen berechnen:

$$H_{thL} = \frac{N_i - (N_r + N_m)}{\gamma(V_x + V_{sp})}. \quad (6)$$

Setzt man im Punkt $V_x/V = 1$ diesen Wert gleich der wirklichen Schaufelarbeit H_{th} , d. h. nimmt man an, daß im Punkt der Normalleistung der Impulsaustausch am Radumfang verschwindet, und nimmt man $V_{sp} \approx 2\%$ des stoßfreien Förderstromes, so läßt sich der Einfluß der Endlichkeit der Schaufelzahl mittels der Minderleistungsziffer p und ψ' berechnen [6]. Diese beiden Ziffern sind definiert durch

$$H_{th} = \frac{H_{th\infty}}{1+p} = \frac{1}{g(1+p)} (u_2 c_{2u} - u_1 c_{0u}), \quad (7)$$

wobei

$$p = 2 \frac{\psi'}{z} \frac{1}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}. \quad (8)$$

Die so erhaltenen Werte sind in Abb. 16 zusammengestellt, wobei aber zu beachten ist, daß diese nur für Normalleistung, also stoßfreien Eintritt gelten und bei Teil- oder Überlast verschieden sind. Danach läßt sich aussprechen:

1. ψ' ist bei diesen Pseudo-Axialschaufeln wesentlich größer als bei den gewöhnlichen Formen der Radialräder.

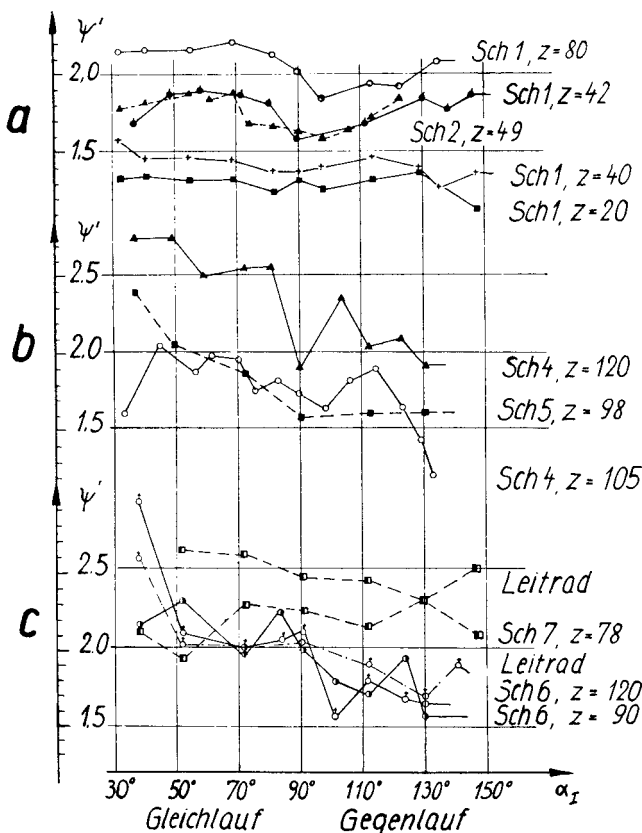


Abb. 16. Minderleistungsheiwert ψ' bei Stoßfreiheit (Schaufelloser Ringraum mit Spiralgehäuse am Austritt).
a Schaufel 1 ($\beta_2 = 40^\circ$), b Schaufel 4 und 5 ($\beta_2 = 90^\circ$), c Schaufel 6 und 7 ($\beta_2 = 120^\circ$)

2. Mit wachsendem β_2 nimmt ψ' etwas zu (wie das auch bei anderen Radformen der Fall ist), etwa gemäß der Gleichung

$$\psi' = 1,0 + (0,8 \text{ bis } 1,2) \frac{\beta_2^0}{100}. \quad (9)$$

3. Bei Gleich- und Gegenlauf können die gleichen ψ' -Werte verwendet werden, wenn auch eine geringe, aber unsichere Neigung zum Sinken mit wachsendem α_I vorliegt.

4. Mit abnehmender Schaufelzahl scheint ψ' ebenfalls kleiner zu werden.

Zusammenfassung

Die Radialschaufeln mit kurzer radialer Erstreckung (Pseudo-Axialschaufeln) ergeben bei Verstellung von Eintrittsleitschaufeln (durch Verformung oder Verdrehung) einen sehr ausgedehnten Regelbereich bei geringer Wirkungsgradeinbuße, so daß dieses Regelverfahren der Drehzahlregelung an Güte nahekkommt. Im übrigen haben diese Pseudo-Axialschaufeln folgende Eigenschaften:

Der Wirkungsgrad der Pumpe (d. h. des Laufrades zusammen mit den beiden Leiträdern) ist im Bereich $\beta_2 < 90^\circ$ besser als im Bereich $\beta_2 > 90^\circ$. Jedoch ist im letzteren Fall (d. h. bei den Hakenschaufeln) das Abreißgebiet kleiner als bei schwach gekrümmten Schaufeln, was beachtlich ist, weil das Abreißen bei dieser Schaufelart häufig schon im Gebiet des besten Wirkungsgrades einsetzt.

Bei allen Versuchen wurde festgestellt, daß der stabile Arbeitsbereich durch Vorschalten eines Gleichrichters (in Gestalt eines Eintrittsleitrades mit senkrecht zum Radumfang gestellten Schaufeln) erheblich zunimmt, wobei der Wirkungsgrad durch die hinzugekommene Reibungsfläche kaum verschlechtert wird. Im gleichen Sinne wirkte der Übergang vom parallelwandigen Laufrad ($b_2 = b_1$) zum konischen Laufrad ($b_2 < b_1$), nur daß hierbei gleichzeitig sich auch der Wirkungsgrad fühlbar (um 5 bzw. 7 %) besserte *). Die (im Bericht nicht beschriebene) Weiterführung der Versuche zeigte, daß eine Verbreiterung der hier verwendeten Räder eine Verschlechterung der Wirkung bringt.

Die Ziffer ψ' , nach welcher die Minderleistung infolge der endlichen Schaufelzahl für Normallast berechnet wird, ist fast doppelt so groß wie beim gewöhnlichen Radialrad.

Der beste Wirkungsgrad liegt etwa im Berechnungspunkt, also beim Zustand des sogenannten stoßfreien Eintritts, sofern die Austrittsleitvorrichtung nicht wesentlich von der dem Förderstrom stoßfreien Laufradeintritts entsprechenden Weite abweicht.

*) Nach neueren Untersuchungen (vgl. K. Rüttschi, Schweizer Archiv, Februar 1951; ferner Brown Boveri Mitt. 1952, Nr. 5/6, S. 165) trifft dies für schmale Räder nicht mehr zu.

Zahlentafel 1

Schaufel- Nummer	1 β_2 ¹⁾	2 β_1 ¹⁾	3 Schaufelart	4 Schaufel- zahl z	5 Austritts- leitvorrichtung ²⁾	6 Laufradausführung und Anordnung	7 Drehzahl 1/min	8 Bemerkungen
1	40° ¹⁾ (42°)	16,5	Blechschaufeln nach Abb. 2 $s = 1$ mm Werkstoff: Dural	20 30 40 42 60 80	Leitring mit Spirale	seitlich offen, Abb. 8a	4000 4000 4000 4000 4000 4000	Schaufeln mit Zapfen versehen und seitlich an Radwand ver- schraubt, Dicke an Radwand 1 mm, am fliegenden Schaufel- ende 0,1 mm
2	40° 40° 45° 45°	30° 30° 23° 23°	Profilschaufeln I, II, III, IV nach Abb. 7b, größte Dicke $s = 3$ mm	49 49 49 49	Leitring mit Spirale	seitlich offen, Abb. 8a, Deck- band a. d. Vollen gedreht, Abb. 8b	4000 4000 4000 4000	Formen I und IVa aus 3 mm starkem Duralblech, das zuvor im Schaufelring eingestemmt war, ausgefräst
3	40° 40° 43,5° 44,5°	30° 21,5° 21,5° 21,5°	Profilschaufeln Ia, IIa, IIIa, IVa nach Abb. 7c, größte Dicke $s = 3$ mm	49 49 49 49	Leitring mit Spirale	seitlich offen, Abb. 8a, nicht konisch, desgl. jedoch konisch	4000 4000 4000 4000	Schaufeln wie bei Schaufel 2 gefräst
4	90° ¹⁾ (88,5°)	28°	Blechschaufeln nach Abb. 3, $s = 1$ mm	15 30 40 60 70 80 105 120	Leitring mit Spirale	seitlich offen, Abb. 8c, ohne Ein- trittsleitschaufeln, $z = 70, 80$ und 105 nach Abb. 8a	3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000	Schaufeln wie bei 1
5	90° (87°)	22° (26°)	Blechschaufeln nach Abb. 5, $s = 1$ mm	98	Leitring mit Spi- rale oder Leitrad	seitlich offen, Abb. 8a	3000	Blechschaufeln gleicher Dicke, a. Eintritt zugeschärft, Schwarz- blech, Befestigung Weichlot
6	120°	28°	Blechschaufeln nach Abb. 6, $s = 1$ mm	60 90 120 120	Leitring mit Spi- rale oder Leitrad	Deckband ⁴⁾ , Abb. 8d	2500 2500 2500 2500	Blechschaufeln wie 5
7	120°	16,3°	Blechschaufeln nach Abb. 6, $s = 1$ mm	78 78	Leitring mit Spi- rale oder Leitrad	Deckband ⁴⁾ , Abb. 8d	3000 3000	Blechschaufeln wie 5
8	125°	30,5°	Profilschaufeln nach Abb. 4	120 120	Leitring mit Spirale	seitlich offen, Abb. 8a, Deckband Abb. 8b	2500 2500	Schaufeln nach Schablone gefräst, Befestigung Weichlot, Deckband wie 2

Ergänzungen: Laufradabmessungen überall $D_2 = 360$, $D_1 = 320$, $b_2 = 22$, $b_1 = 28$ mm, seitliche Begrenzung konisch mit Ausnahme von Schaufel 3, dadurch Anwachsen von c_{om} nach außen um 13 %.

¹⁾ Hier wurde der durch Nachmessen erhaltene wirkliche Schaufelwinkel angegeben. Bei Schaufel 1, 4 und 5 ist er durch die Zahl in der runden Klammer gekennzeichnet. —
²⁾ Schaufeln Nr. 1 bis 4 sind so bemessen, daß die Schluckfähigkeit der Spiralgehäuse ohne Austrittsleitrad im Fall senkrechten Laufradeintritts gerade ausgenutzt wird. Im Gegenlaufbereich müßte ein Austrittsleitrad hier beschleunigend wirken und würde damit schädlich sein. Deshalb ist bei diesen Schaufeln nur mit Spiralgehäuse und zwischengeschaltetem Leitring, also mit fester Austrittsleitvorrichtung gefahren. — ³⁾ Die Drehzahl (Nennzahl) müßte mit wachsendem β_2 gesenkt werden, um eine Überlastung des Pendelmotors zu vermeiden. Bei den Gegenlaufversuchen müßte auch diese Nennzahl noch unterschritten werden. Die Ergebnisse wurden dann nach dem Affinitätsgesetz umgerechnet. — ⁴⁾ Deckband aus 1 mm starkem Zinkblech gedrückt.